



Bestemmelse af dæmpning for blad- og tårnsvingninger

Thomsen, K.

Publication date:
2002

Document Version
Publisher's PDF, also known as Version of record

[Link back to DTU Orbit](#)

Citation (APA):
Thomsen, K. (2002). *Bestemmelse af dæmpning for blad- og tårnsvingninger*. Denmark. Forskningscenter Risoe. Risoe-R No. 1371(DA)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Bestemmelse af dæmpning for blad- og tårnsvingninger

Kenneth Thomsen

Forskningscenter Risø, Roskilde

Oktober 2002

Resumé Der er foretaget en undersøgelse af muligheden for at bestemme den aerodynamiske dæmpning for blad- og tårnsvingninger for en vindmølle i drift. Der er valgt en metode, hvor en svingningsform exciteres ved hjælp af vingernes pitchsystem, med en frekvens og fase svarende til den ønskede svingningsform. Ved afslutning af excitationen kan den effektive aerodynamiske dæmpning fastlægges ud fra udklingningen af responssignaler fra møllen.

Metoden er udviklet og etableret på baggrund af aeroelastiske beregninger med HAWC og FLEX5 for en BONUS 2MW aktiv stall-reguleret mølle. Den er eksperimentelt verificeret på en 1.3MW mølle ved excitation af tårnsvingninger.

Resultaterne viser, at det er muligt at excitere de ønskede svingningsformer ved hjælp af pitchsystemet. Efterfølgende kan dæmpningen fastlægges ved at analysere responssignalerne fra møllen med hensyn til udklingning.

Undersøgelsen er udført under kontrakt med Energistyrelsen, j.nr. ENS 1363/00-0006.

Deltagere i projektet var Stig Øye, Danmarks Tekniske Universitet, Bernt Pedersen, LM Glasfiber A/S samt bl.a. Peder Enevoldsen, Søren Lind, Søren Vinther, Jørgen Thirstrup Petersen og Christian Lund Svendsen, alle Bonus Energy A/S. Fra Risø har Morten H. Hansen og Christian Bak bidraget betydeligt. Idéen med at udnytte pitchsystemet som excitation blev præsenteret af Stig Øye for projektgruppen. De anvendte målinger er udført af Bonus Energy A/S.

ISBN 87-550-3128-5

ISBN 87-550-3129-3 (Internet)

ISSN 0106-2840

Print: Pitney Bowes Management Services Danmark A/S, 2002

Indhold

1	Indledning	5
2	Aeroelastisk modellering	6
3	Dynamisk analyse med HAWCModal	8
4	Laststatistik	15
5	Udvalgte tidsserier	18
6	Excitation af tårnsvingninger	22
7	Excitation af bladsvingninger	28
8	Eksperimentel verifikation	32
9	Konklusion	37

1 Indledning

Ved etablering af lastgrundlag for vindmøller benyttes i overvejende grad aeroelastiske modeller. Centralt i en sådan modellering er interaktionen imellem den aerodynamiske belastning og vindmøllens strukturdynamiske opførsel - det aeroelastiske respons. Denne interaktion er ganske kompleks, og ofte benyttes udtrykket aerodynamisk dæmpning til at kvantificere det arbejde som de aerodynamiske kræfter udfører under en given svingning, se f.eks. Petersen *et al.* [1]. Det er grundlæggende for et korrekt beregnet lastgrundlag at den aerodynamiske dæmpning forudsiges korrekt.

I en tidligere undersøgelse, Thomsen *et al.* [2], blev der udviklet en eksperimentel metode til bestemmelse af dæmpning for kantvise svingninger. Undersøgelsen var initieret af problemer med kantvise svingninger i starten af 1990'erne, - typisk 500-600 kW møller. I undersøgelsen blev der udviklet en metode, hvor det fra møllernes nacelle er muligt at excitere de to kantvise hvirvlingsformer med en roterende excentrisk masse og efterfølgende bestemme den samlede dæmpning (aerodynamisk og strukturel) ved at analysere udklingningen af hvirvlingsamplituderne. Hermed kan den aerodynamiske dæmpning af kantvise svingninger kortlægges for en given vindmølle.

Formålet med denne undersøgelse er, at udvikle en metode til at bestemme dæmpning for andre svingningsformer end de kantvise for en mølle i drift. Der fokuseres især på tårnsvingningsformerne og på de flapvise svingningsformer. Den aerodynamiske dæmpning for disse svingningsformer er interessant i relation til laster generelt, og det er vigtigt at få kortlagt, hvilken margin der for disse svingningsformer er til en ustabil tilstand (negativ dæmpning). For visse multi-MW møller har der både beregningsmæssigt og eksperimentelt vist sig tårnlaster på et niveau, som er betydeligt højere, end hvad der kan forventes udfra opskalering fra mindre møller. Dette kan muligvis have relation til den aerodynamiske dæmpning.

I undersøgelsen benyttes de aeroelastiske modeller HAWC [3] og FLEX5 [4] til at udvikle en passende excitationmetode. Det er valgt at foretage undersøgelsen på en Bonus 2MW mølle med aktiv stallregulering.

Der er i undersøgelsen fokuseret på en excitationmetode, hvor pitchsystemet udnyttes. Forskellige andre excitationmetoder har været undersøgt undervejs, men det er karakteristisk for masse-excitationsprincippet at kravet til f.eks. roterende masse er voldsomt. For at excitere en tårnsvingning kræves f.eks. en excentrik på ca. 1000 kgm, hvilket konstruktionsmæssigt er en udfordring.

I afsnit 2 beskrives den aeroelastiske modellering af møllen og en dynamisk analyse er givet i afsnit 3. En sammenligning af målte og beregnede laster er vist i afsnit 4. I afsnittene 6 og 7 er excitation af henholdsvis tårn- og bladsvingninger illustreret på baggrund af aeroelastiske beregninger. En eksperimentel verifikation af den udviklede metode er indeholdt i afsnit 8.

2 Aeroelastisk modellering

Der er foretaget en modellering af Bonus 2MW møllen med de aeroelastiske modeller HAWC og FLEX5. Der er benyttet to forskellige modeller for at reducere usikkerheden i metodeudviklingen af excitationismetoden. Det vil sige, at excitationismetoden udvikles sideløbende i begge modeller.

I den udstrækning det har været muligt, er der benyttet samme inputdata til modellerne.

I HAWC modelleringen er anvendt Mann turbulensmodellen, [5] mens der i FLEX5 er anvendt Veers turbulensmodellen, [6]. Denne forskel i modellering af turbulensen giver anledning til en mindre forskel i de beregnede tårnlaster, se Thomsen [7].

I den benyttede udgave af Bonus 2MW møllen er møllen udstyret med LM36.8 vinger. Profilerne på denne vinge er fra NACA 63-400 serien og der er monteret forskellige aerodynamiske modifikationer på vingerne. For at beregne realistiske laster – og aerodynamisk dæmpning – er i både FLEX5 og HAWC modelleringen benyttet et sæt profildata som er estimeret fra målinger af effekt og middellaster, Bak [8].

Der er i HAWC modellen benyttet Beddoes-Lieschmann modellen for dynamisk stall, mens der i FLEX5 er regnet med Øye modellen for dynamisk stall.

Møllen er aktiv stallreguleret, men i beregningerne er det antaget at variationen i pitchvinkler er så langsom, at disse ikke varierer indenfor en given beregning (vindhastighed). Det vil sige, at det er antaget at møllen kører som stallreguleret, men med forskellige pitchvinkler ved forskellige vindhastigheder.

Møllens struktur er modelleret med samme inputdata (primært masse- og stivhedsfordeling) i de to forskellige modeller i det omfang det er muligt. For analysen er det centralt, at de beregnede svingningsegenskaber er sammenlignelige, dvs. egenfrekvenser, svingningsformer og strukturdæmpninger.

I tabel 1 er angivet de målte og beregnede egenfrekvenser for møllen under stilstand. For både HAWC og FLEX5 modellen er disse værdier baseret på en egenværdiløsning for den stillestående mølle. I HAWCModal [9] er det muligt at beregne svingningsegenskaber for en mølle i drift, se næste afsnit. Der ses i tabel 1 enkelte forskelle imellem dels modellerne, dels modellerne og de målte værdier. Disse forskelle vurderes ikke at være af betydning for undersøgelsen.

Tabel 1. Stilstandsegenfrekvenser [Hz] for Bonus 2MW møllen.

Svingningsform	målt	FLEX5	HAWC
1. tårn langs	0.32	0.33	0.33
1. tårn tværs	0.32	0.33	0.34
1. torsion (fri-fast)	0.56	0.56	0.62
1. asym. flap (yaw)	0.86	0.92	0.93
1. asym. flap (tilt)	0.98	0.98	1.00
1. sym. flap	1.17	1.16	1.16
1. kant (yaw)	1.83	1.83/1.86	1.77/1.82

3 Dynamisk analyse med HAWC-Modal

Det er formålet med undersøgelsen at udvikle en metode til at bestemme den aerodynamiske dæmpning for en mølle under drift. Det er derfor vigtigt at kortlægge møllens strukturdynamiske egenskaber netop i en driftstilstand, dvs. med rotationseffekter. Dette er foretaget med modellen HAWCModal [10] og resultaterne er vist i dette afsnit.

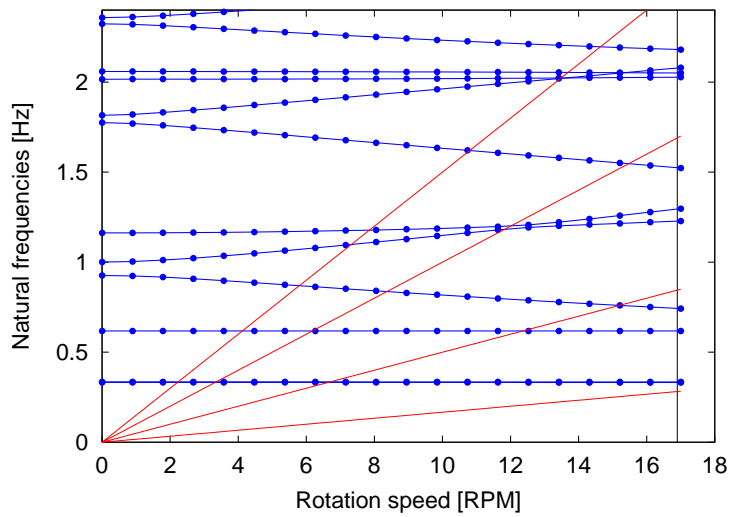
I figur 1 er egenfrekvenserne for møllen under drift optegnet. Som forventet er tårnsvingningsfrekvenserne ikke varierende med omdrejningstallet, mens bladsvingningsfrekvenserne varierer. Bemærk at de viste frekvenser refererer til det faste koordinatsystem.

De beregnede modale dæmpninger er vist i figur 2. Ved driftsomedrejningstallet er dæmpningen af 1. tårnsvingning 2.06%, symmetrisk flap 3.11%, baglæns hvirvlende flap 3.34% og forlæns hvirvlende flap 2.25%. I forbindelse med bestemmelse af dæmpning fokuseres især på disse svingningsformer. Det er derfor vigtigt, at frekvenserne for netop disse svingningsformer kendes for møllen ved det nominelle driftomdrejningstal. Frekvenserne ved hhv. stilstand og nominel omdrejningstal er givet i tabel 2.

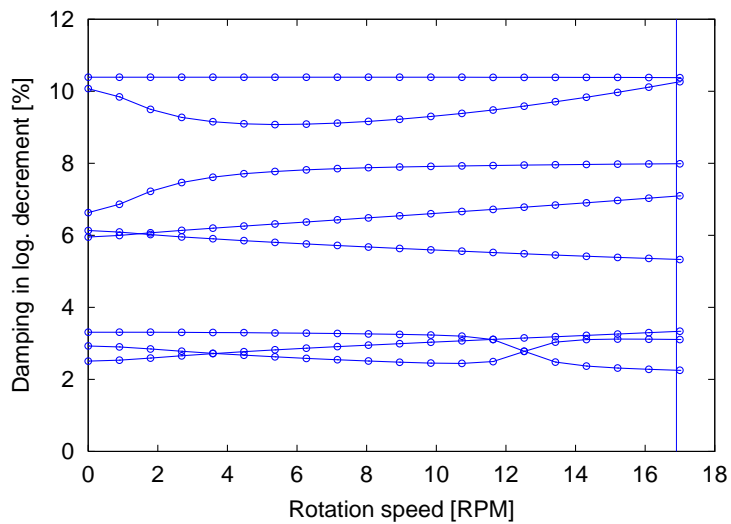
Tabel 2. Egenfrekvenser ved stilstand og nominel omdrejningstal [Hz] for Bonus 2MW møllen beregnet med HAWCModal.

Svingningsform	stilstand	nom. rpm
1. tårn tværs	0.332	0.332
1. tårn langs	0.335	0.335
1. baglæns hvirvling flap	0.926	0.742
1. forlæns hvirvling flap	1.000	1.300
1. sym. flap	1.163	1.229

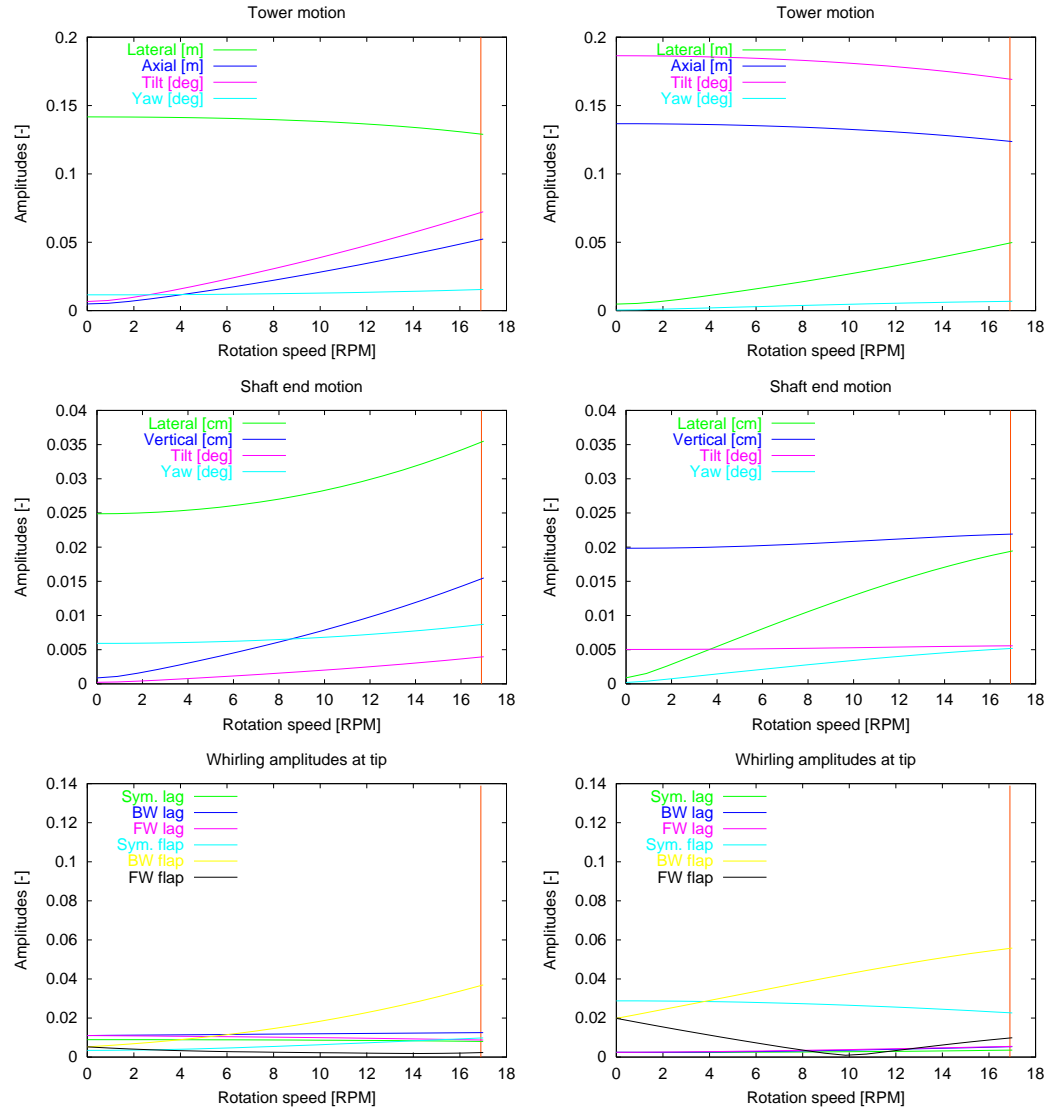
I figurene 3-7 er de første ti svingningsformer illustreret som relativ amplitude i dels tårntop, akselende og bladtip, se eventuelt [11] for detaljer.



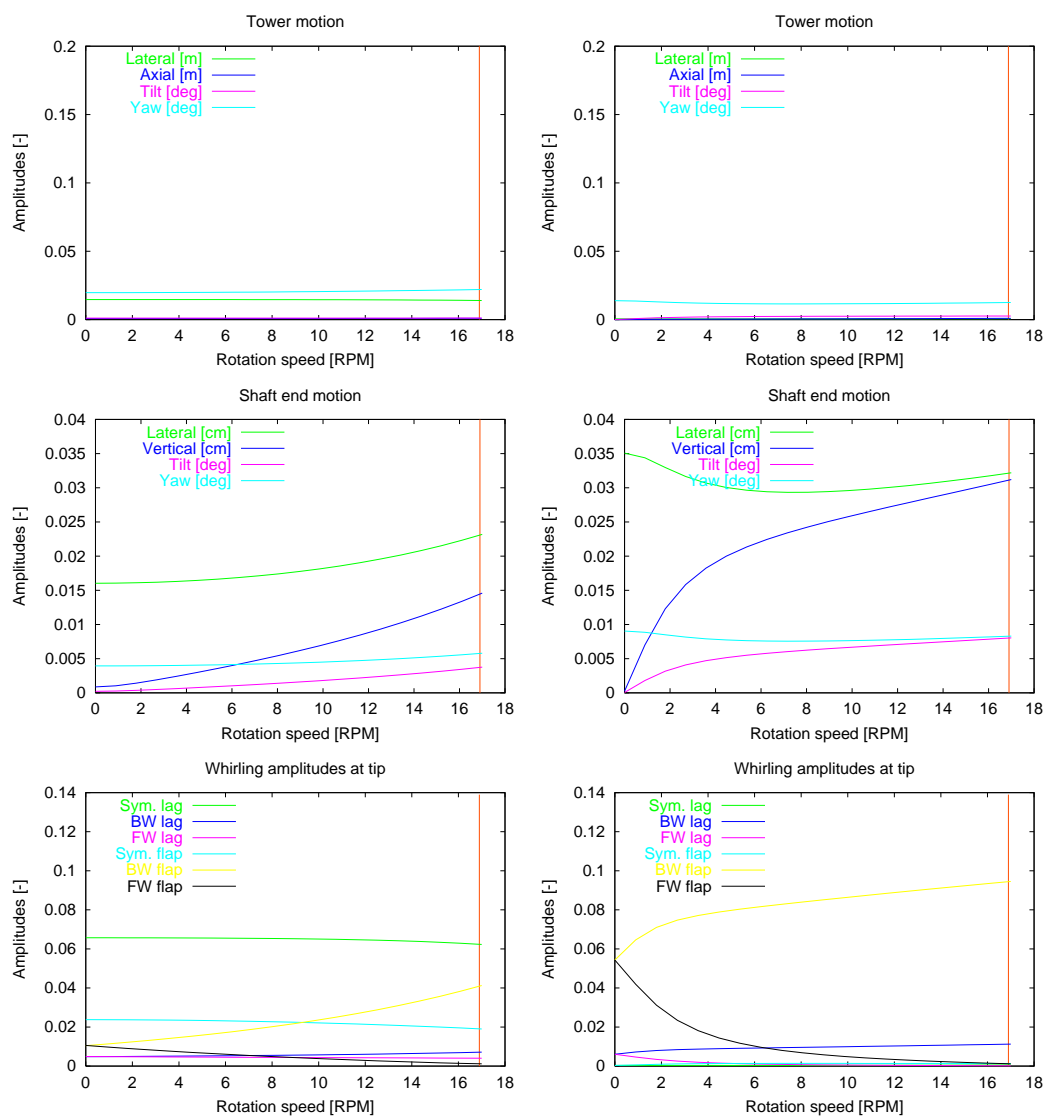
Figur 1. Campbell diagram for Bonus 2MW møllen beregnet med HAWCModal. De røde linier angiver 1P, 3P, 6P, and 9P. Den vertikale linie angiver nominel omdrejningstal.



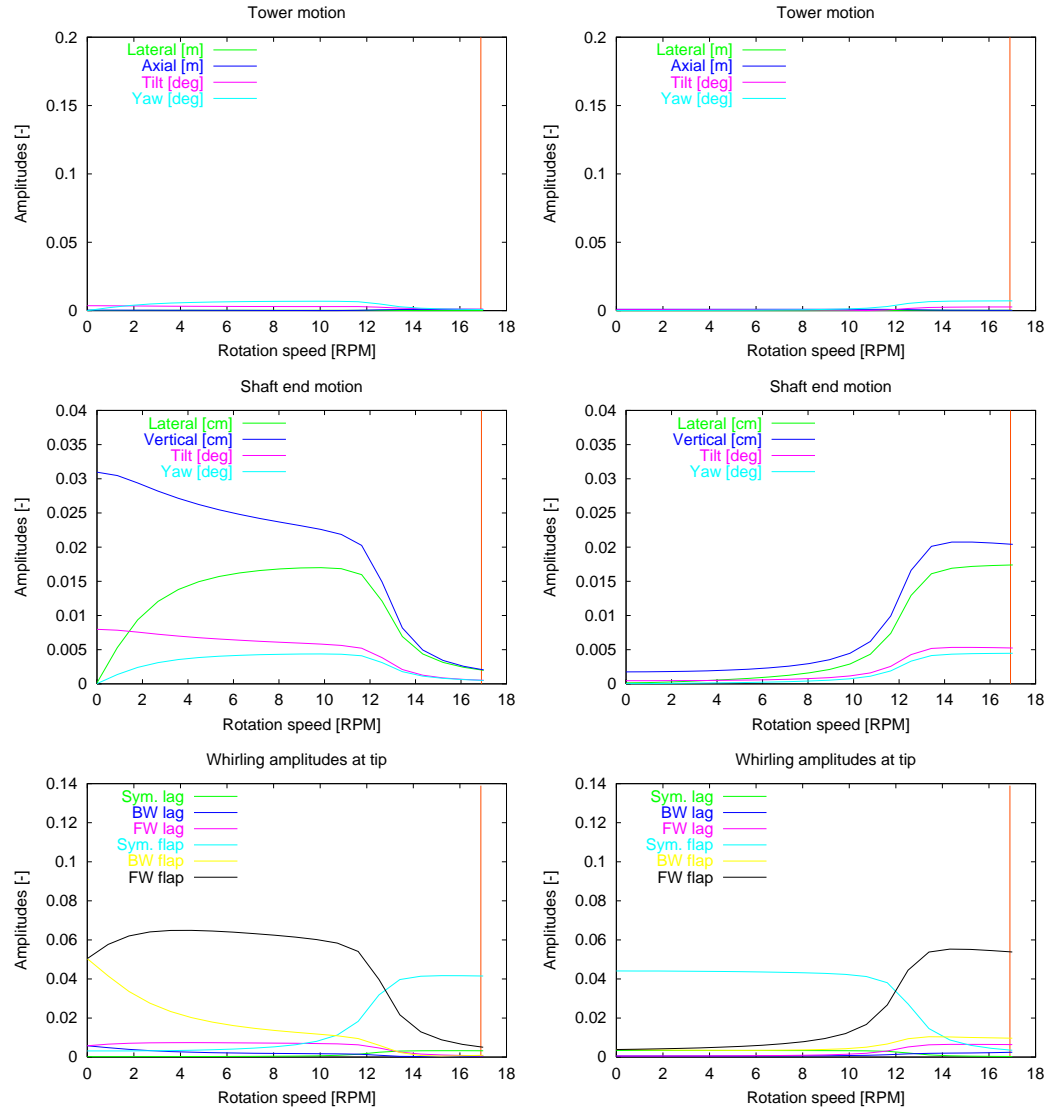
Figur 2. Dæmpning som funktion af omdrejningstallet for Bonus 2MW møllen beregnet med HAWCModal



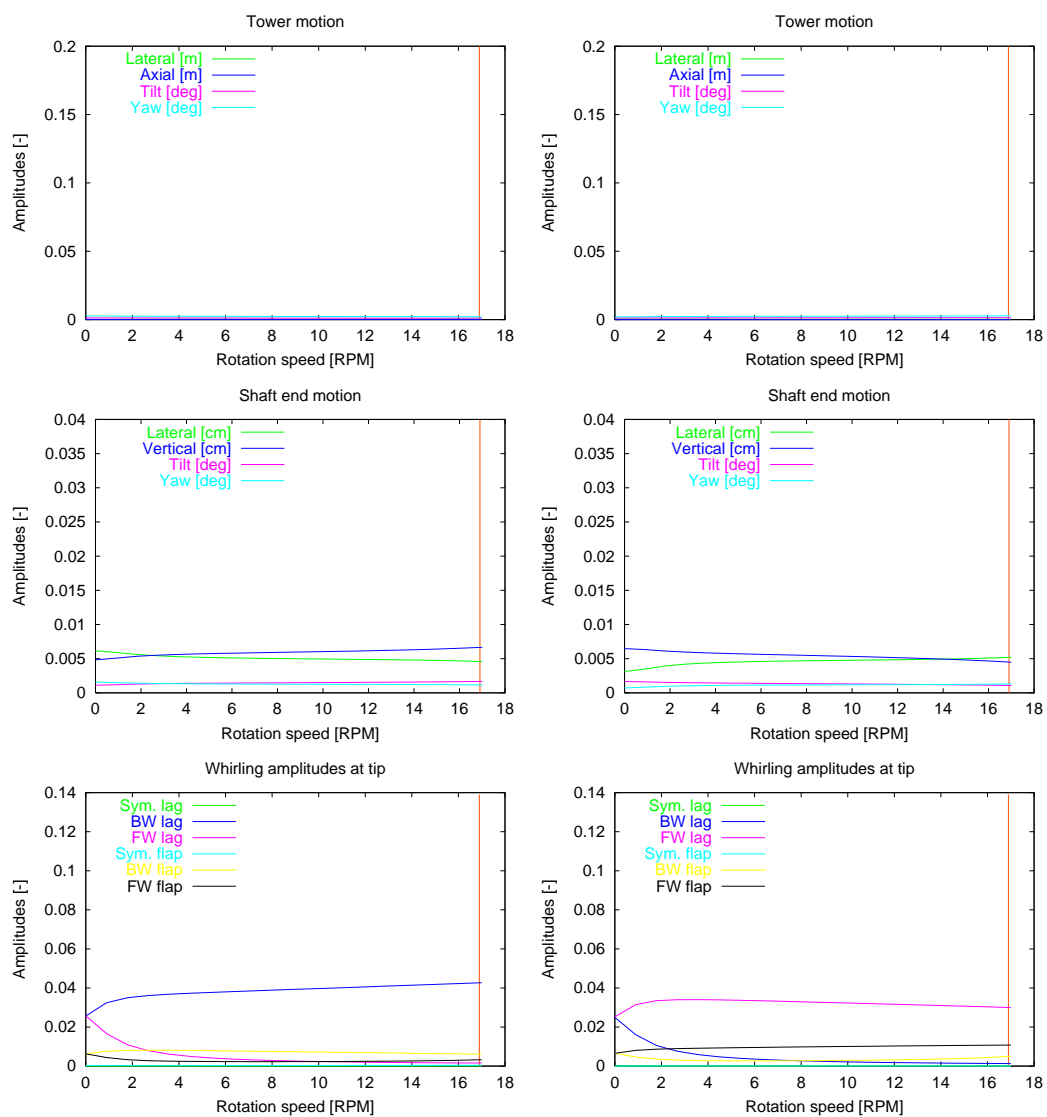
Figur 3. Modale amplituder for mode 1 (venstre) og mode 2 (højre) for Bonus 2MW møllen beregnet med HAWCModal.



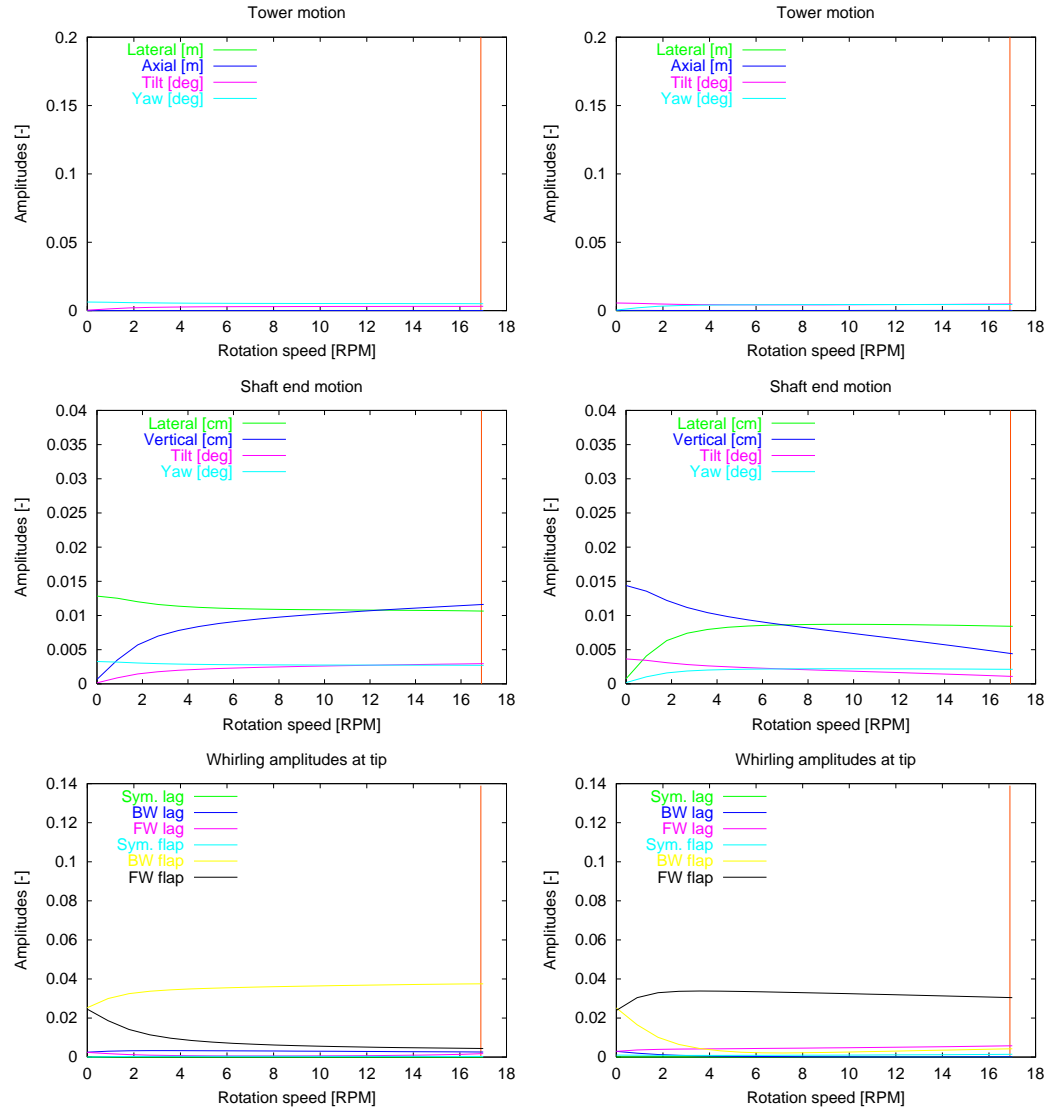
Figur 4. Modale amplituder for mode 3 (venstre) og mode 4 (højre) for Bonus 2MW møllen beregnet med HAWCModal.



Figur 5. Modale amplituder for mode 5 (venstre) og mode 6 (højre) for Bonus 2MW møllen beregnet med HAWCModal.



Figur 6. Modale amplituder for mode 7 (venstre) og mode 8 (højre) for Bonus 2MW møllen beregnet med HAWCModal.



Figur 7. Modale amplituder for mode 9 (venstre) og mode 10 (højre) for Bonus 2MW møllen beregnet med HAWCModal.

4 Laststatistik

I dette afsnit sammenlignes beregnet laststatistik fra de aeroelastiske modeller med målte laster. Målingerne er leveret af Bonus Energy A/S og svarer til de målinger der er benyttet til at estimere profildata, [8].

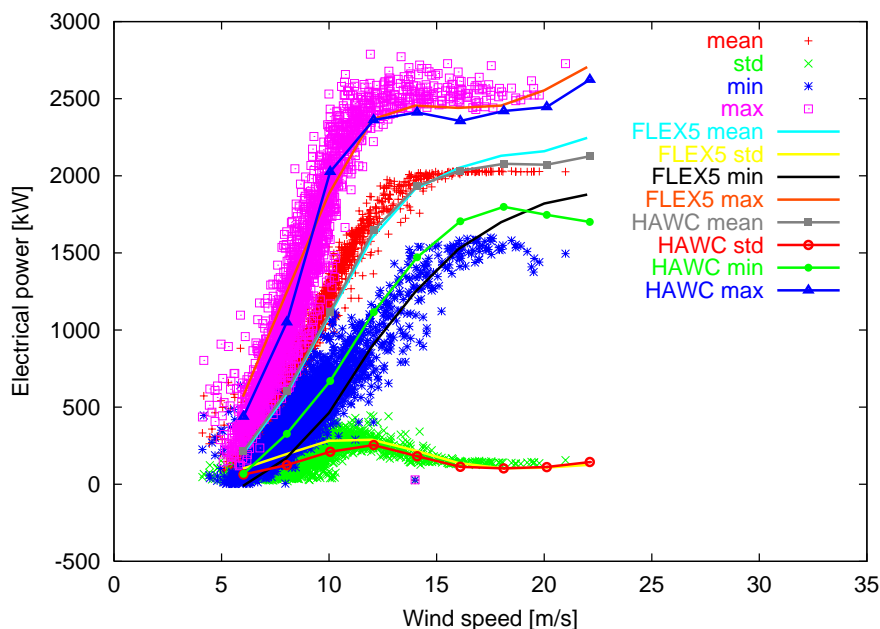
Beregningerne er alle af en varighed på 300 s og der er for hver model benyttet repræsentative turbulensidsserier, Thomsen [7]. Turbulensintensiteten i målingerne er omkring 15%.

Der er regnet for vindhastigheder mellem 6 og 22 m/s, med spring på 2 m/s. For hver vindhastighed er der benyttet den korrekte værdi af pitchvinklen, svarende til middelværdien af den målte pitchvinkel ved den pågældende vindhastighed.

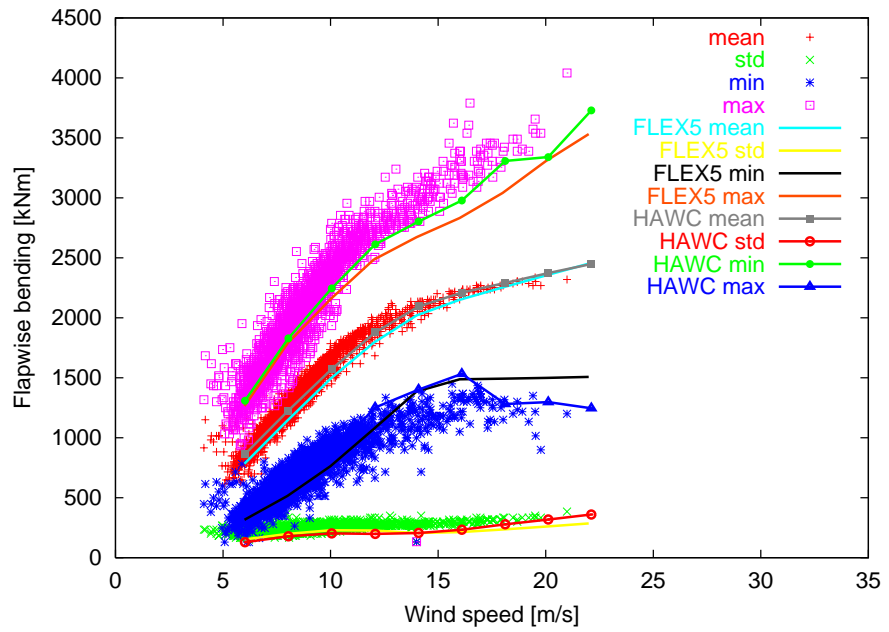
Sammenligningerne viser en god overensstemmelse mellem begge modeller og målinger. De små forskelle mellem de to modellers forudsigelser skyldes forskelle i turbulensmodelleringen, samt mindre forskelle i den aerodynamiske modellering (specielt forskel i modellering af fordelingen af profildata ud langs med vingen).

I det kantvise middelmoment ses en forskel mellem målinger og de to sæt beregninger. Det skyldes, at signalet fra de kantvise strain gauges kobler med flaplasten på grund af tøjningsforholdene i vingeroden. Dette resulterer i at en komponent fra det flapvise moment indgår i det kantvise moment, [12].

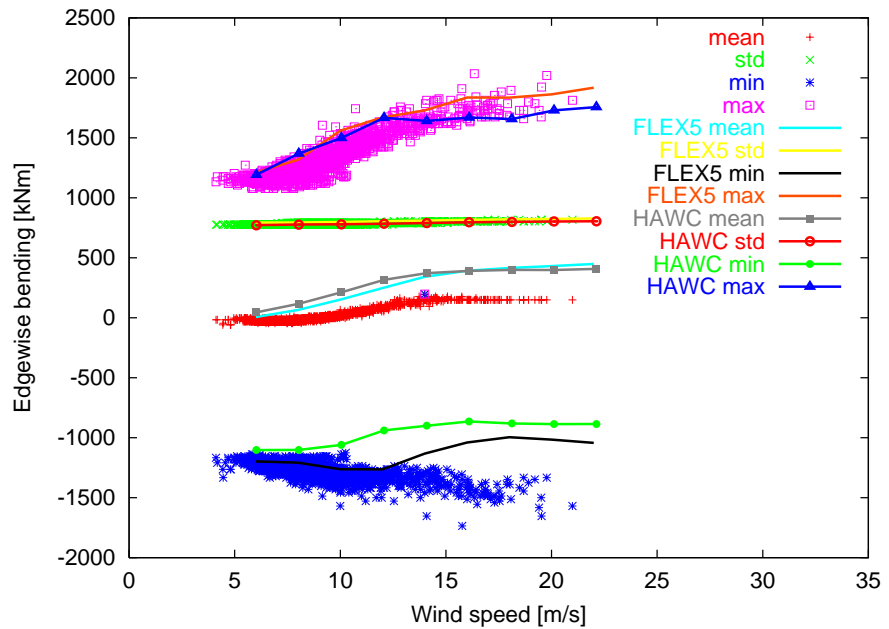
Der ses også en markant forskel mellem det beregnede lastniveau for det langsående tårnbøjningsmoment, specielt ved de højere vindhastigheder. Dette tilskrives en kombination af usikkerhed i lastkalibreringen og at der er benyttet en relativt bred vindretningssektor i datasorteringen.



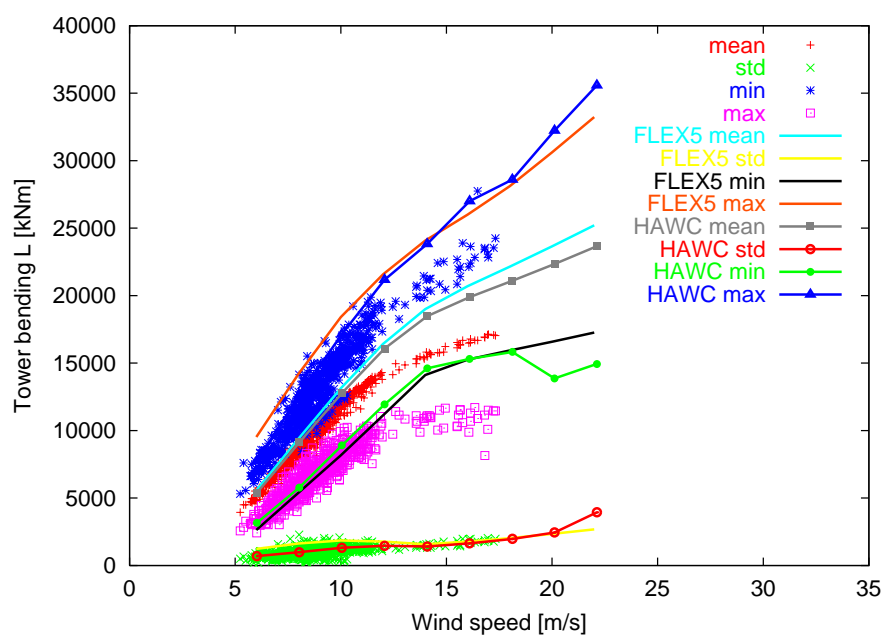
Figur 8. Sammenligning af laststatistik for elektrisk effekt.



Figur 9. Sammenligning af laststatistik for flapmoment.



Figur 10. Sammenligning af laststatistik for kantmoment.



Figur 11. Sammenligning af laststatistik for langsgående tårnbundmoment.

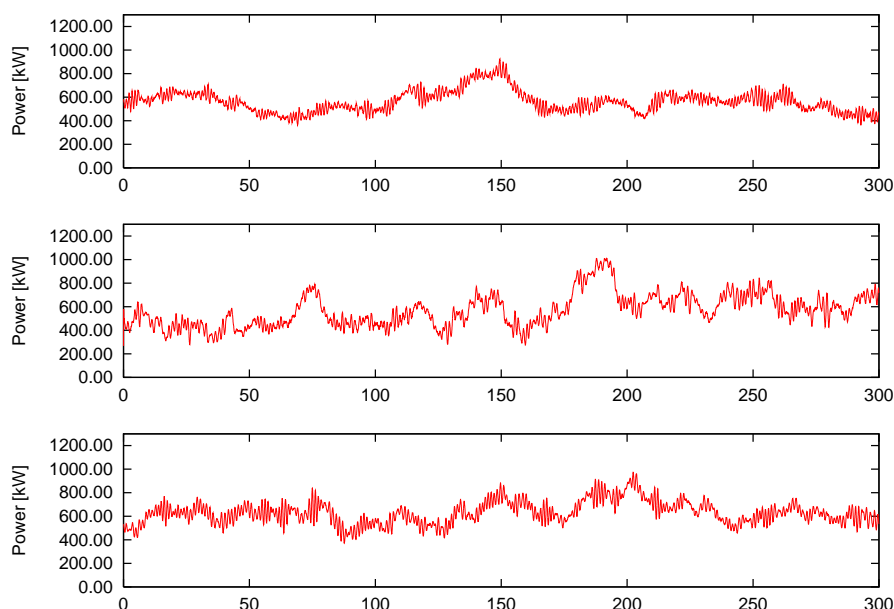
5 Udvalgte tidsserier

For at illustrere karakteren af de målte og beregnede laster vises der i dette afsnit eksempler på tidsserier. Der er udvalgt tidsserier for 8 m/s og 16 m/s, i begge tilfælde med en turbulensintensitet omkring 0.12 og en krøje fejl på ca. 12°.

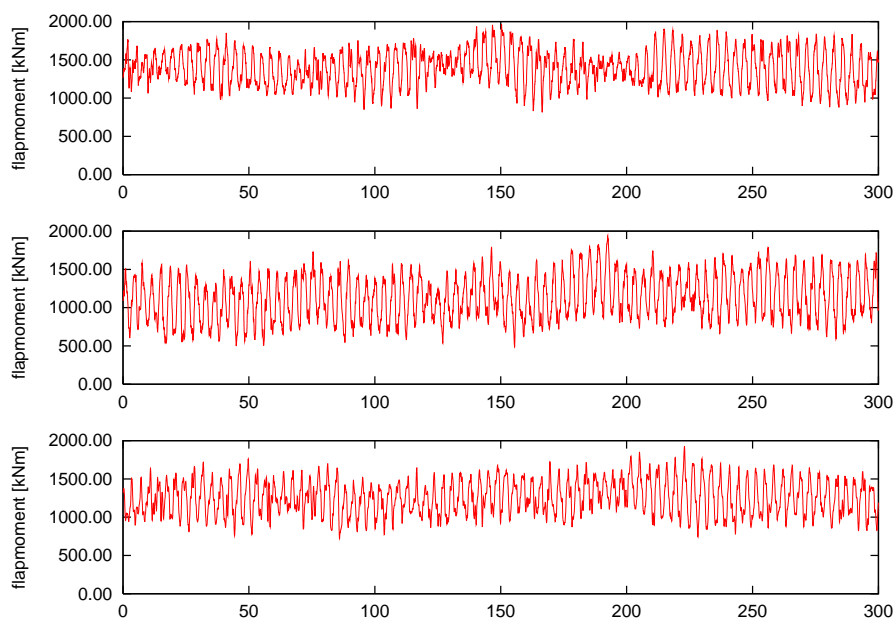
Resultaterne er vist i figurerne 12-14 for 8 m/s og i figurerne 15-17 for 16 m/s. Tre lastsensorer er vist: elektrisk effekt, flapmoment og tårnbøjningsmoment.

Ved 8 m/s har de målte og beregnede tidsserier ens karakter. De små forskelle der er kan skyldes bla. forskel i turbulensen og for modellernes vedkommende forskel i diskretisering i aerodynamikken. Det skal bemærkes, at det målte moment i tårnbunden ikke er målt i en retning direkte svarende til nacelleretningen. Der er en forskel på ca. 15-20°.

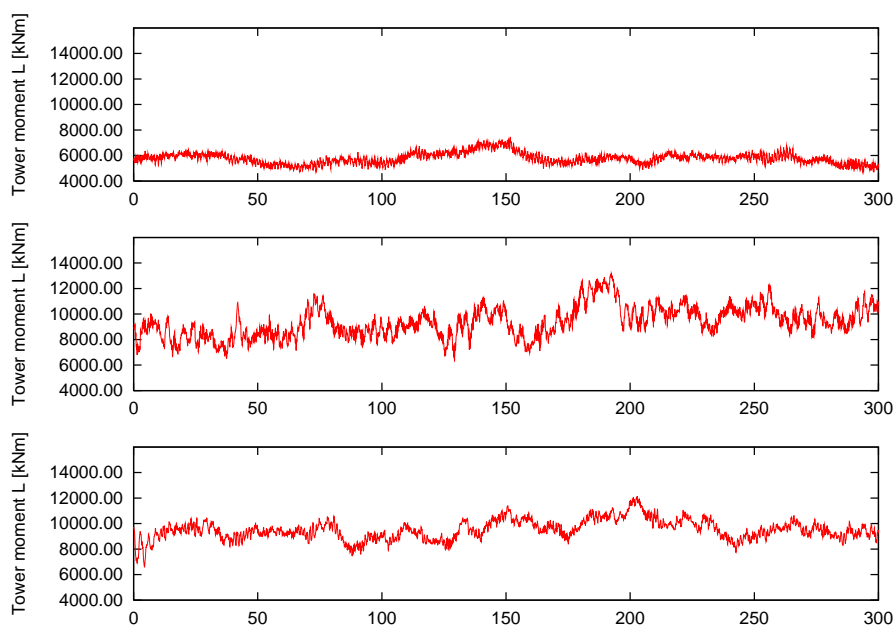
Ved 16 m/s ses en god overensstemmelse imellem målt og beregnet flapmoment og tårnmoment, mens karakteren af den målte elektriske effekt er forskellig fra de to beregninger. Sammenlignes med statistikken for denne sensor, figur 8, ses en forskel i hældningen på middelkurven ved netop 16 m/s. Hældningen af den målte middelkurve er nul, medens begge beregninger har en svag positiv hældning. Denne forskel vil give sig udslag i en forskel i det dynamiske respons, idet hældningen bidrager med et dæmpende led. Eller med andre ord at de dynamiske stallegenskaber dermed er forskellige (fordi profildata ikke er modelleret helt ens). Da hældningen - og dermed dæmpningen - er lavest i det målte signal, vil det dynamiske respons være størst i den målte tidsserie. Forskellen vurderes ikke at være væsentligt for responset af de øvrige laster.



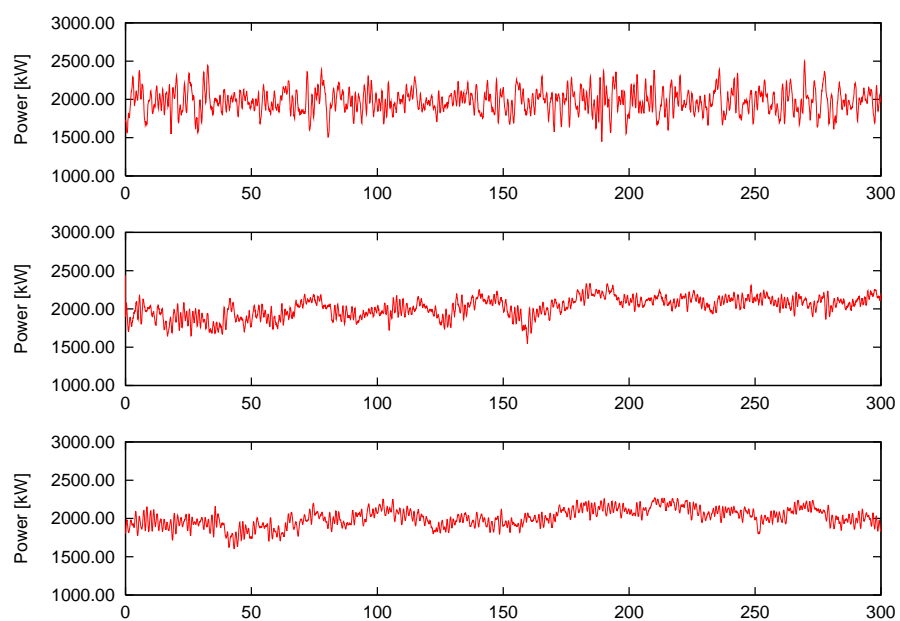
Figur 12. Sammenligning af elektrisk effekt ved 8 m/s. Fra top: måling, FLEX5, HAWC.



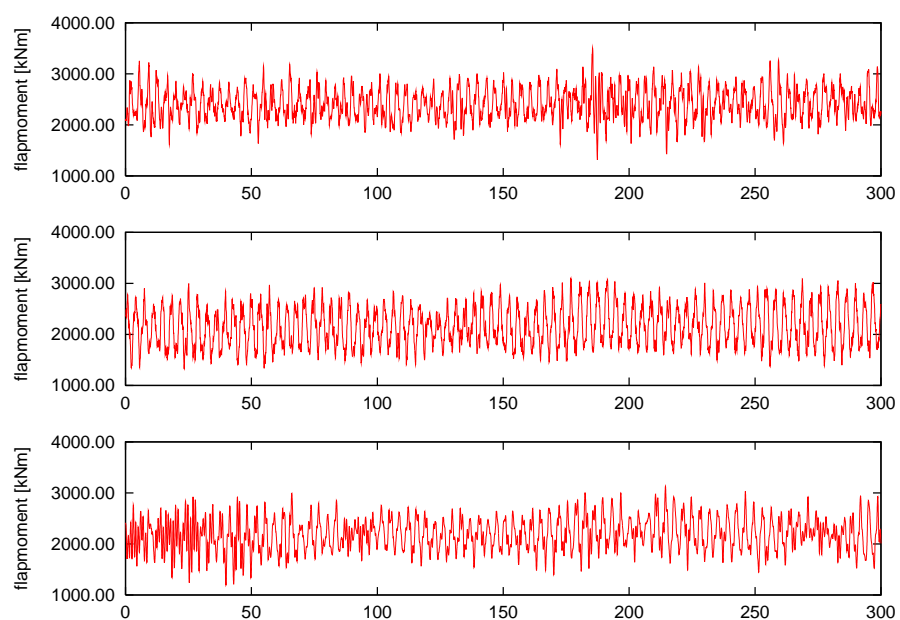
Figur 13. Sammenligning af flapmoment ved 8 m/s. Fra top: måling, FLEX5, HAWC.



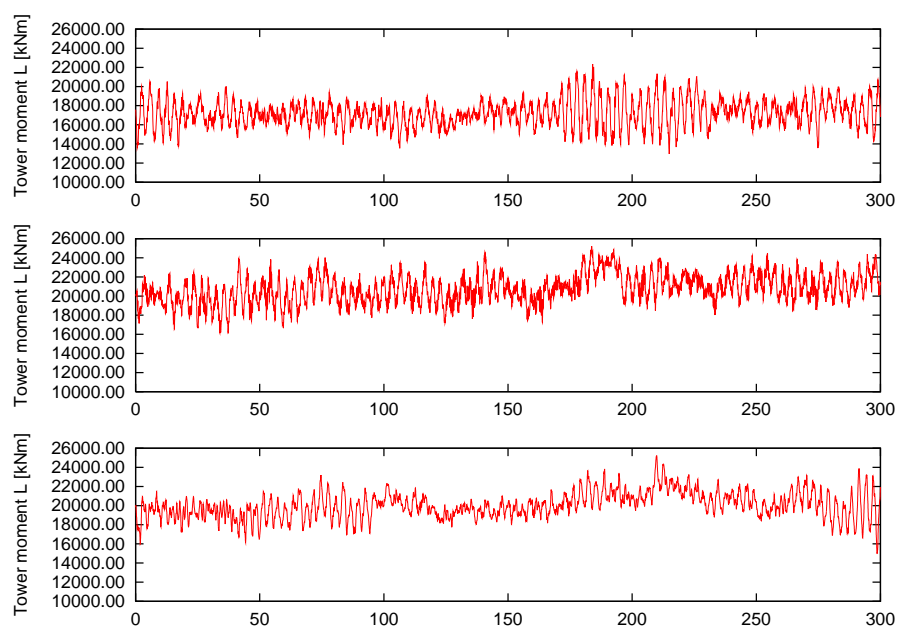
Figur 14. Sammenligning af langsgående tårnmoment ved 8 m/s. Fra top: måling, FLEX5, HAWC.



Figur 15. Sammenligning af elektrisk effekt ved 16 m/s. Fra top: måling, FLEX5, HAWC.



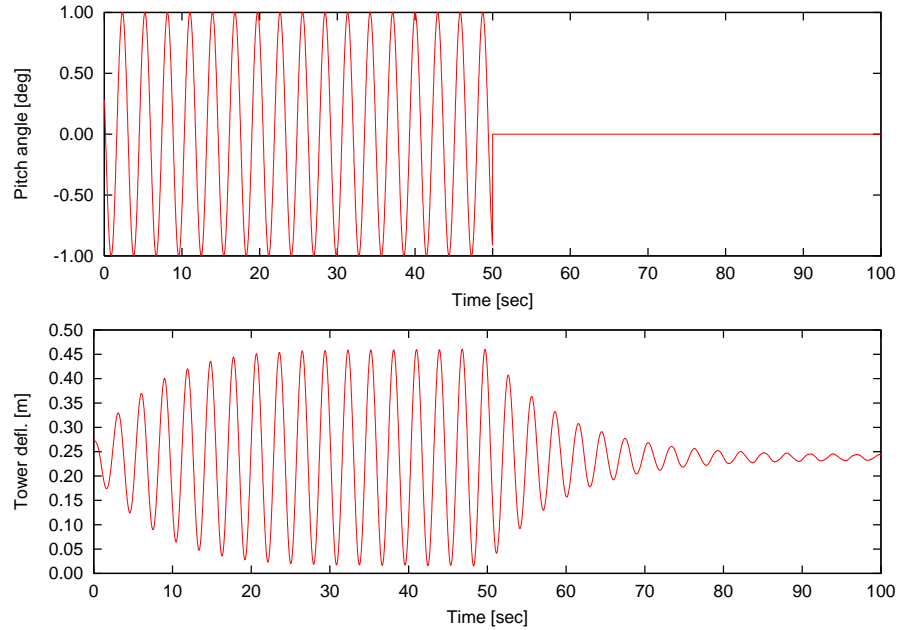
Figur 16. Sammenligning af flapmoment ved 16 m/s. Fra top: måling, FLEX5, HAWC.



Figur 17. Sammenligning af langsgående tårnmoment ved 16 m/s. Fra top: måling, FLEX5, HAWC.

6 Excitation af tårnsvingninger

Til excitation af tårnsvingningsformerne benyttes pitchsystemet på møllen. Ved at variere pitchvinklerne på de tre vinger i takt med en frekvens svarende til tårnfrekvensen genereres et varierende aksialtryk, og dermed kan en tårnsvingning startes.



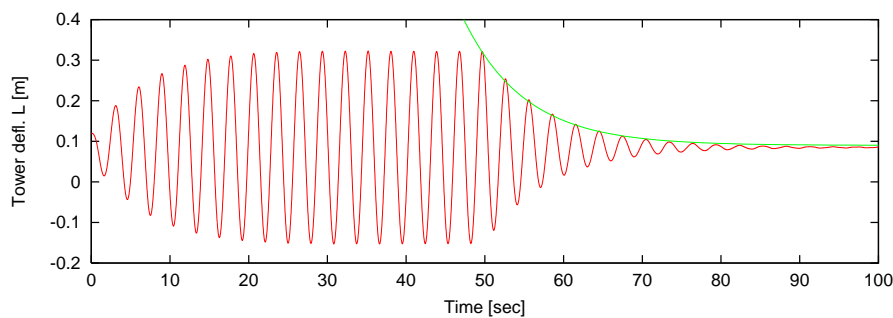
Figur 18. Excitation af tårnsvingning ved 6 m/s, beregnet med HAWC.

Princippet er vist i figur 18. Her er excitationen foretaget med en harmonisk pitchvinkel variation på $\pm 1^\circ$ omkring middelværdien af pitchvinklen (ved denne vindhastighed 0°). Hvor andet ikke er anført i det følgende er samme pitchvariation benyttet.

Den langsgående udbøjning af tårntoppen er også vist i figur 18, og det ses tydeligt hvordan svingningen bygger op. Ved $T=50\text{sec}$ stoppes variationen af pitchvinklen og tårnsvingningen klinger ud. I figur 19 er en exponentialfunktion af typen $f(t) = a \exp(-\delta f_t t)$, hvor f_t er 1. tårnegenfrekvens, fittet til ud klingningsforløbet. I dette eksempel er dæmpningen $\delta=0.36$.

I tabel 3 er dæmpningen vist for en række vindhastigheder og for både FLEX5 og HAWC. I figurerne 20 og 21 er amplituderne i tårntoppen vist i henholdsvis langsgående og tværgående retning.

Excitation ved symmetrisk pitchning af de tre vinger vil samtidig give anledning til bevægelse af tårnet på tværs, figur 21. Det skyldes, at den aerodynamiske dæmpning er lavest i en skrå retning i forhold til rotorplanet, og ikke i en retning direkte vinkelret på dette. Optegnes tårntopudbøjningerne som funktion af hinanden, figur 22, kan det ses, at svingningen fortsætter - efter stop af excitationen - i en retning ca. 45° skråt i forhold til rotorplanet. Set forfra svinger møllen skråt bagud i retning med omdrejningsretningen. Den aerodynamiske dæmpning



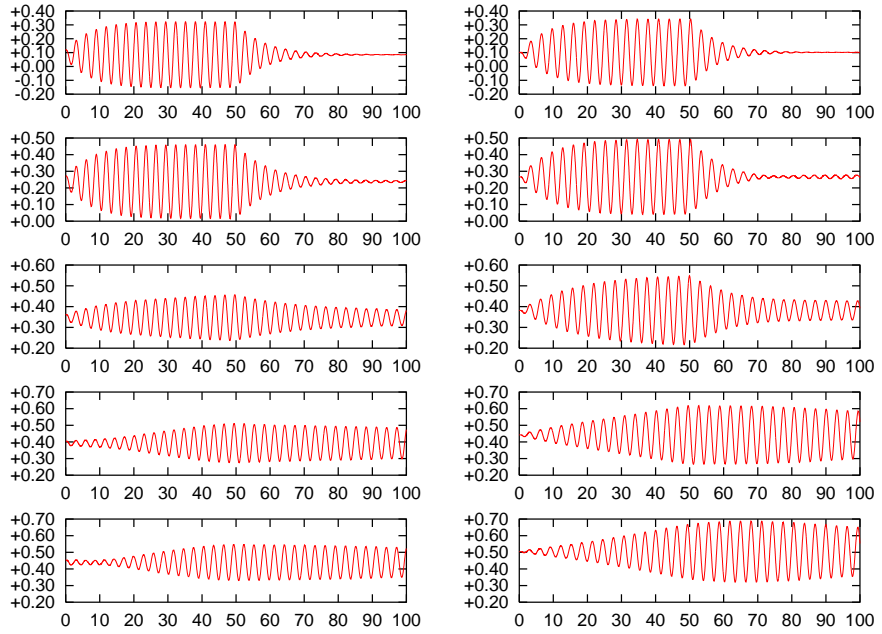
Figur 19. Fitning af langsgående tårnudebøjning ved 6 m/s.

Tabel 3. Dæmpning fundet ved udklingning af langsgående tårnudebøjning. Dæmpningsværdier er logaritmisk dekrement.

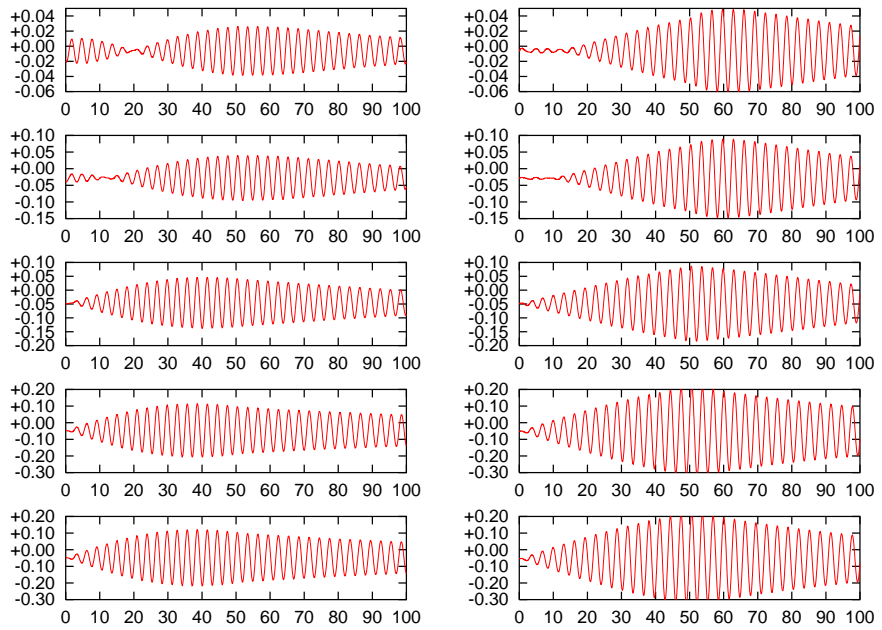
Vindhastighed [m/s]	FLEX5	HAWC
6	0.40	0.36
10	0.40	0.26
14	0.13	0.08
18	0.01	0.01
22	0.02	0.01

er lavest i denne retning. Ved 6 m/s ender svingningen i en ren tværsvingning, jævnfør figur 20, mens vinklen fra 14 m/s til 22 m/s er næsten konstant omkring 45° .

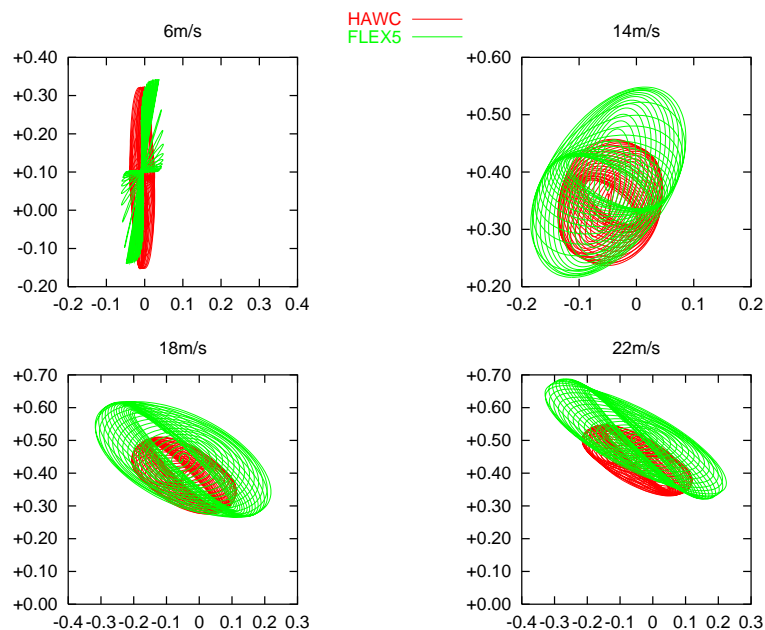
Frakobles tårnets fleksibilitet på tværs (uendelig stift tårn på tværs), tvinges svingningen i en retning direkte vinkelret på rotorplanet. Dette resulterer i en større dæmpning, tabel 4, end når møllen er fleksibel på tværs, hvilket er konsistent med den effektive resulterende svingningsretning i figur 22.



Figur 20. Langsgående tårntopudbøjning ved excitation af tårnsvingning med HAWC (venstre) og FLEX5 (højre). Fra top: 6m/s, 10m/s, 14 m/s, 18m/s og 22m/s.



Figur 21. Tværgående tårntopudbøjning ved excitation af tårnsvingning med HAWC (venstre) og FLEX5 (højre). Fra top: 6m/s, 10m/s, 14 m/s, 18m/s og 22m/s.



Figur 22. XY plot af de to tårntopudbøjninger ved excitation af tårnsvingning.

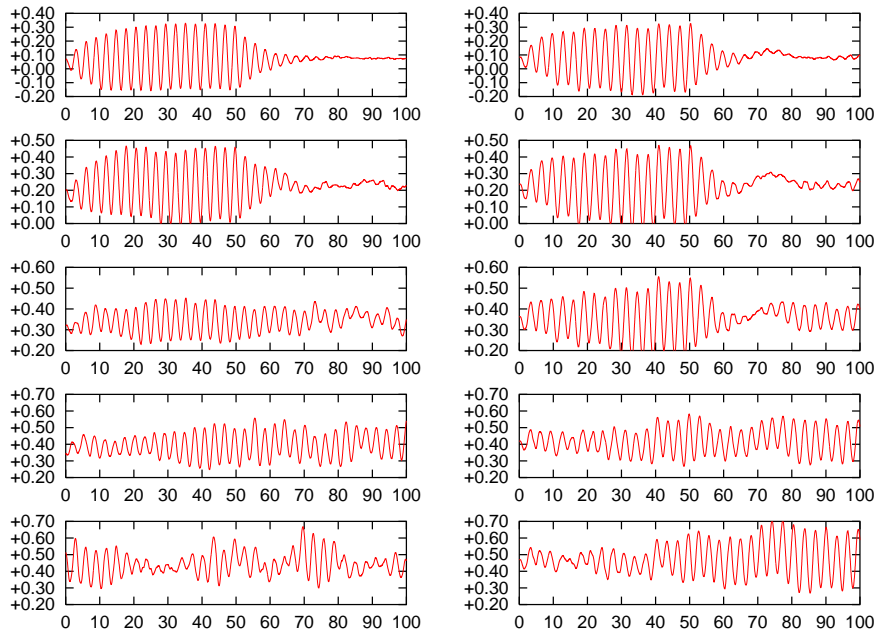
Tabel 4. Dæmpning fundet ved udklingning af langsgående tårnudbøjning med møl-
len stiv i tværgående retning. Dæmpningsværdier er logaritmisk dekrement.

Vindhastighed [m/s]	FLEX5	HAWC
6	0.41	0.33
10	0.33	0.27
14	0.17	0.12
18	0.16	0.11
22	0.15	0.11

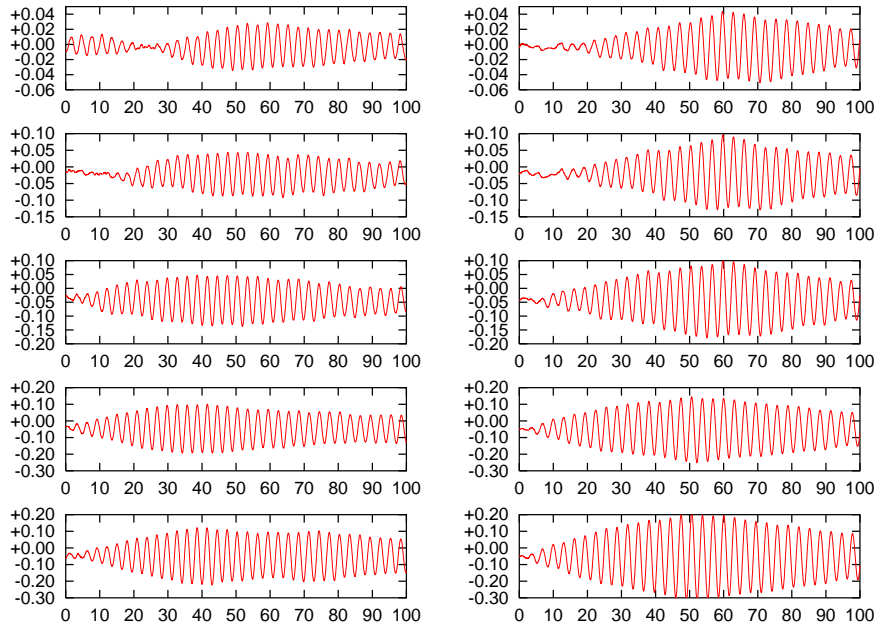
Vindens turbulens vil påvirke responset under og efter en excitation med en forstyrrelse, som vil medføre, at dæmpningen skal bestemmes under ikke-idelle forhold. For at undersøge betydning af dette, er der foretaget simuleringer med turbulens. Der er regnet med en turbulensintensitet på 0.15, og resultatet er vist ved en række vindhastigheder i figurerne 23 og 24.

Samme mønster som tidligere ses i resultaterne, dog er det ikke så let at fastlægge dæmpningen ud fra forløbet af udklingningskurverne. En direkte sammenligning med og uden turbulens er givet i figur 25, hvorfra det kan ses at problemet er størst ved de højeste vindhastigheder, hvor signalet er lille i forhold til turbulensens forstyrrelse.

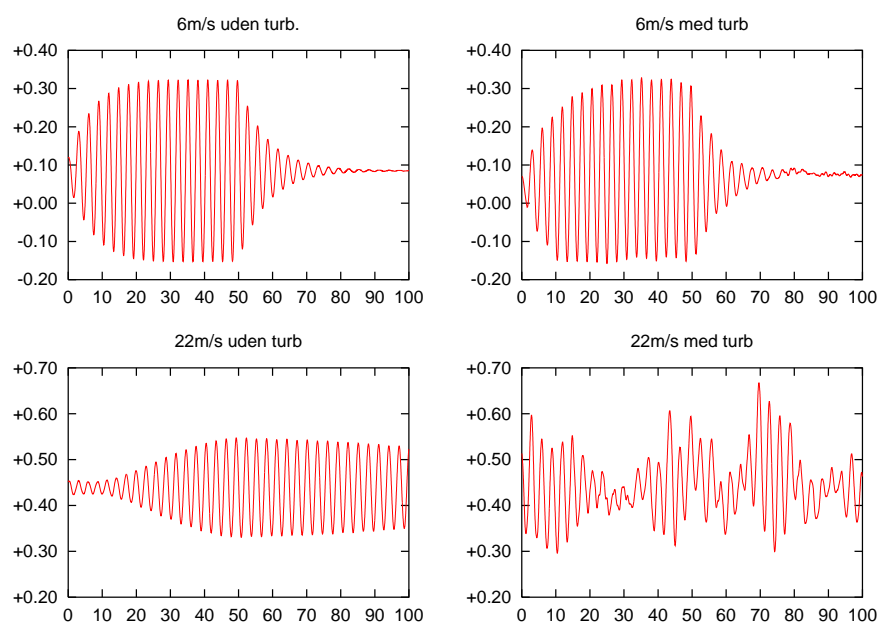
En løsning på dette problem kan være at benytte en større pitchamplitude. Dette er vist i figur 26, hvor pitchamplituden er 3° . I samme figur er vist et udbøjningssignal, som er højpasfiltreret. Dermed fjernes den lavfrekvente forstyrrelse fra turbulensen, og det er muligt at identificere dæmpningen på samme måde som for situationen uden turbulens.



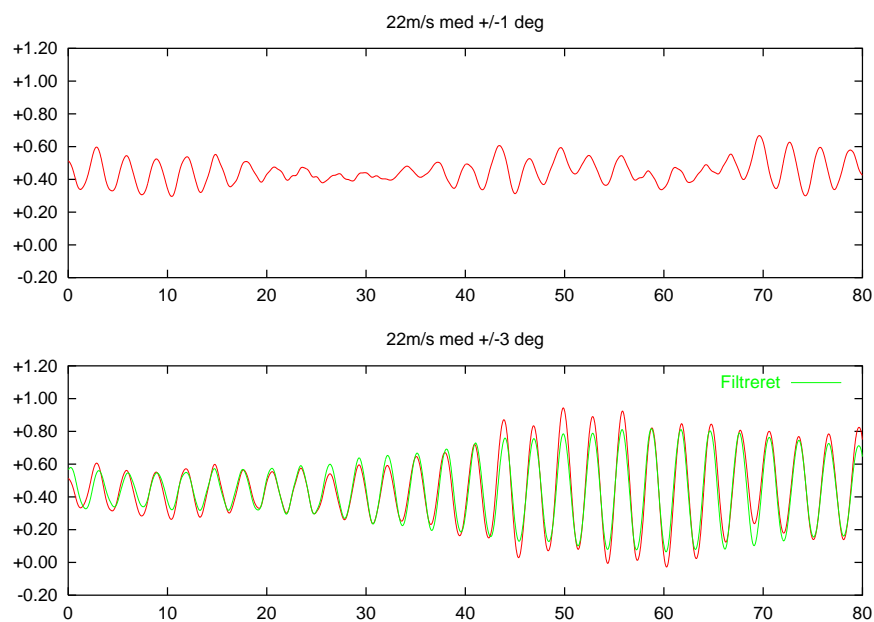
Figur 23. Langsgående tårntopudbøjning ved excitation af tårnsvingning med HAWC (venstre) og FLEX5 (højre). Der er regnet med turbulens med en intensitet på 0.15. Fra top: 6m/s, 10m/s, 14 m/s, 18m/s og 22m/s.



Figur 24. Tværgående tårntopudbøjning ved excitation af tårnsvingning med HAWC (venstre) og FLEX5 (højre). Der er regnet med turbulens med en intensitet på 0.15. Fra top: 6m/s, 10m/s, 14 m/s, 18m/s og 22m/s.



Figur 25. Langsgående tårntopudbøjning ved excitation af tårnsvingning med HAWC med og uden turbulens ved 6 og 22 m/s.



Figur 26. Langsgående tårntopudbøjning ved excitation af tårnsvingning med HAWC med hhv. 1° og 3° pitchamplitude. I nederste figur er signalet også vist højpasfiltreret (0.3Hz)

7 Excitation af bladsvingninger

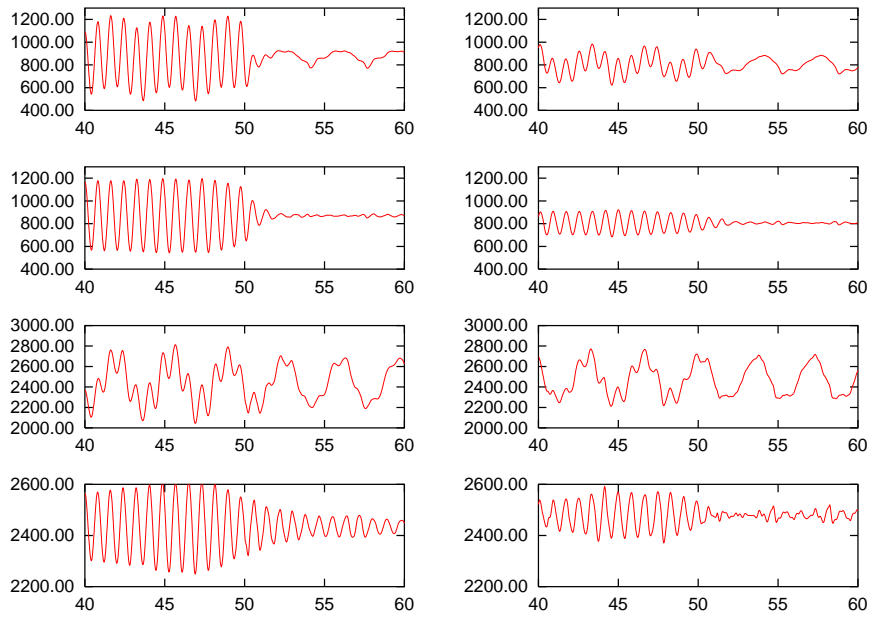
Metoden med af udnytte pitchsystemet til excitation kan også benyttes til at excitere de møllesvingningsformer som indeholder store flapvise bevægelser, f.eks. mode 4, 5 og 6 vist i figurene 4 og 5.

Ved at pitche vingerne samtidigt med en frekvens svarende til den flapvise egenfrekvens under drift, se afsnit 3, exciteres den symmetriske flapvise svingningsform, figur 27. Betegnes pitchvinklerne θ_i for blad i bliver excitationen:

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = \sin(1.23 \cdot 2\pi \cdot t) \quad (1)$$

hvor t er tiden.

Det flapvise moment indeholder en væsentligt deterministisk komponent fra vindprofil og tårnskygge, og denne komponent kan fjernes med et højpasfilter. Herefter kan signalet behandles på samme måde som tårnlastsignalet og dæmpningen kan identificeres. I tabel 5 er dæmpningsværdierne for den symmetriske flapvise svingningsform givet ved 6 m/s og 22 m/s. Som forventet er denne svingningsform stærkt dæmpet.



Figur 27. Flapvis rodmoment ved excitation af symmetrisk flapvise svingning med (HAWC) og FLEX5 (højre). Fra top: 6 m/s, 6 m/s og højpasfiltreret, 22 m/s, 22 m/s og højpasfiltreret.

Dæmpningen for de asymmetriske flapvise svingningsformer, forlæns og baglæns hvirvlende flap, kan også bestemmes ud fra forsøg med pitchexcitation. I dette tilfælde skal frekvenserne fra HAWCModal-analysen transformeres til det roterende koordinatsystem, hvori excitationen foretages. Ved det nominelle omdrejningstal er den baglæns flapvise hvirvlingsfrekvens 0.74 Hz og den opleves fra det roterende blad som denne frekvens plus 1P, hvilket giver en frekvens på

Tabel 5. Dæmpning fundet ved udklingning af lavpasfiltret flapmoment. Dæmpningsværdier er logaritmisk dekrement.

Vindhastighed [m/s]	FLEX5	HAWC
6	0.46	0.90
22	0.28	0.22

$0.74+0.28=1.02$ Hz. Den forlæns hvirvlingsfrekvens er 1.30 Hz, og den opleves fra bladet som frekvensen minus 1P, $1.30-0.28=1.02$ Hz. I det roterende koordinatsystem er det altså den samme frekvens der skal benyttes til at excitere de flapvise hvirvlingsformer.

Da det er asymmetriske rotorsvingningsformer, er det nødvendig at faseforskyde excitationen mellem de tre vinger. Nummereres vingerne 1, 2 og 3 efter tårnpas-sage skal vinge 2 faseforskydes 120° bagud i forhold til vinge 1 og vinge 3 skal faseforskydes 240° bagud i forhold til vinge 1 for at excitere baglæns hvirvlende flap. Det vil sige at excitationen ved baglæns hvirvling er:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \sin(1.02 \cdot 2\pi \cdot t) \\ \theta_2 &= \sin(1.02 \cdot 2\pi \cdot t - 2\pi/3) \\ \theta_3 &= \sin(1.02 \cdot 2\pi \cdot t - 4\pi/3)\end{aligned}\tag{2}$$

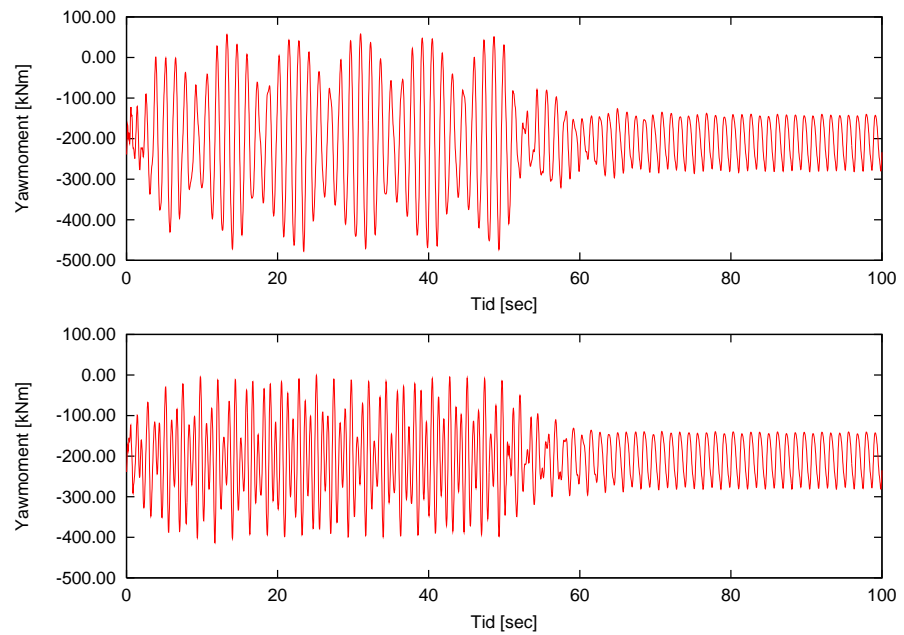
For forlæns flapvis hvirvling bliver excitationen:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= \sin(1.02 \cdot 2\pi \cdot t) \\ \theta_2 &= \sin(1.02 \cdot 2\pi \cdot t + 2\pi/3) \\ \theta_3 &= \sin(1.02 \cdot 2\pi \cdot t + 4\pi/3)\end{aligned}\tag{3}$$

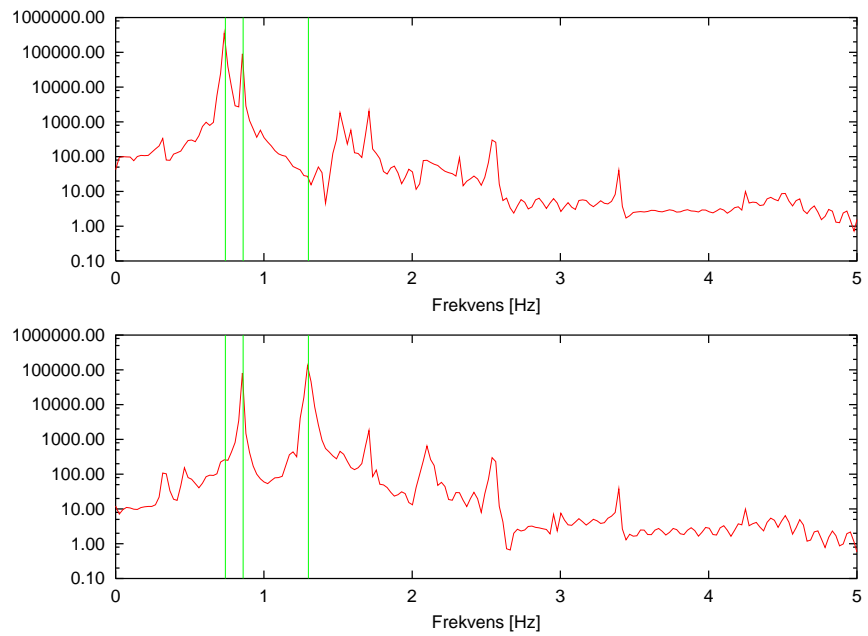
Excitationen af disse hvirvlingsformer er illustreret i figur 28, hvor responset for yawmomentet er vist for excitation af hver hvirvlingerne ved 22 m/s. I begge tilfælde stopper excitationen ved $t=50$ sekunder og svingningen klinger ud og ender med et rent 3P signal svarerende til den deterministiske last fra vindprofil og tårnskygge.

Frekvensspektre af yawmomentet er vist i figur 29. Her ses de to flapvise hvirvlingsfrekvenser tydeligt.

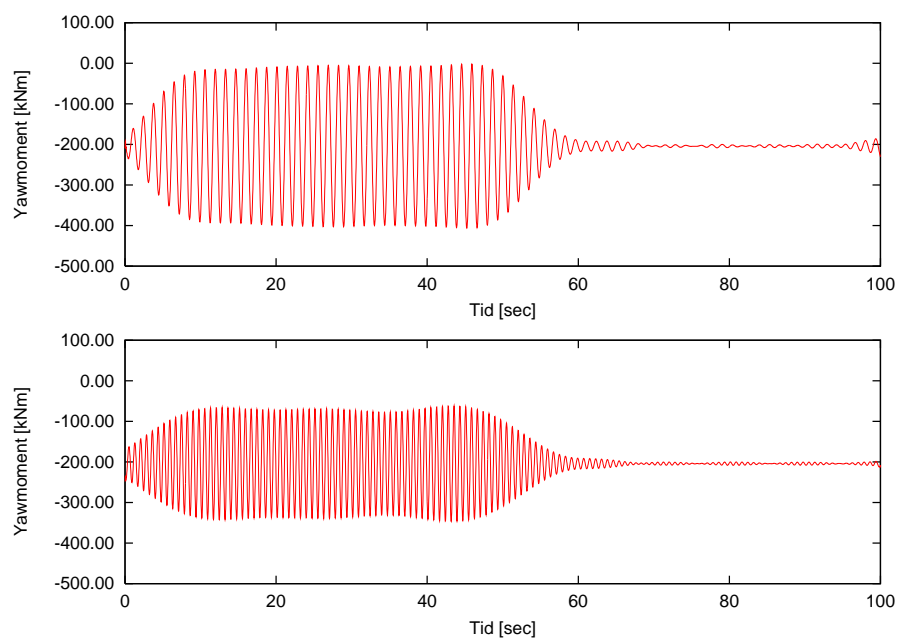
For at bestemme dæmpningen er det også i dette tilfælde nødvendigt at filtrere responssignalet, figur 30. Her er benyttet et båndpasfilter omkring den relevante hvirvlingsfrekvens. Alternativt kan beregnes hvirvlingsamplituder efter samme metode som benyttet i en tidligere undersøgelse af kantvise svingninger, [2]. I denne metode sammenlægges responssignaler fra de tre vinger til normalkoordinater, hvorfra amplituderne af hhv. forlæns og baglæns hvirvling kan bestemmes med en frekvens-dekomponering. Fra disse amplituder kan dæmpningen herefter bestemmes.



Figur 28. Yawmoment ved excitation af flapvis hvirvling med HAWC. Øverst baglæns hvirvling, nederst forlæns hvirvling. Vindhastigheden er 22 m/s.



Figur 29. PSD af yawmoment ved excitation af flapvis hvirvling med HAWC. Øverst baglæns hvirvling, nederst forlæns hvirvling. Vertikale linier er (fra venstre) baglæns frekvens, $3P$, forlæns frekvens.



Figur 30. Båndpasfiltreret yawmoment ved excitation af flapvis hvirvling med HAWC. Øverst baglæns hvirvling, nederst forlæns hvirvling.

8 Eksperimentel verifikation

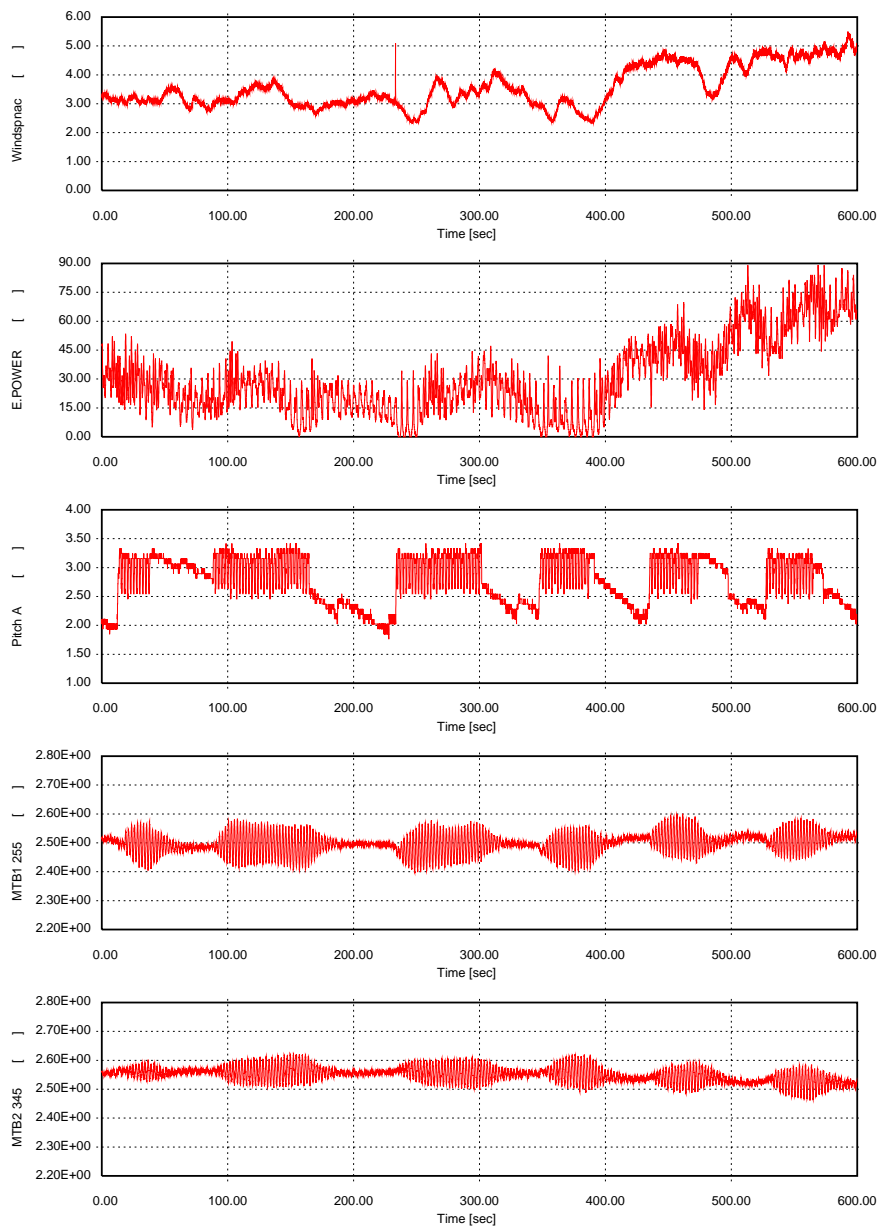
Der er foretaget en eksperimentel verifikation af excitationismetoden på en BONUS 1.3MW mølle.

Metoden er eftervist ved en vindhastighed på 3 m/s, hvor møllen kører på det lave omdrejningstal. Excitationen er foretaget ved at overlejlre referencepitchsignalet til styringen med en sinusfunktion. Derved foretages en symmetrisk pitchning af de tre vinger med en amplitude på 0.7° og en frekvens på 0.41 Hz svarende til denne mølles 1. tårnfrekvens. På grund af den lave vindhastighed opererer møllen tæt på den maksimale positive pitchvinkel, hvilket bevirker, at pitchvariationen ikke bliver en ideel sinusvariation.

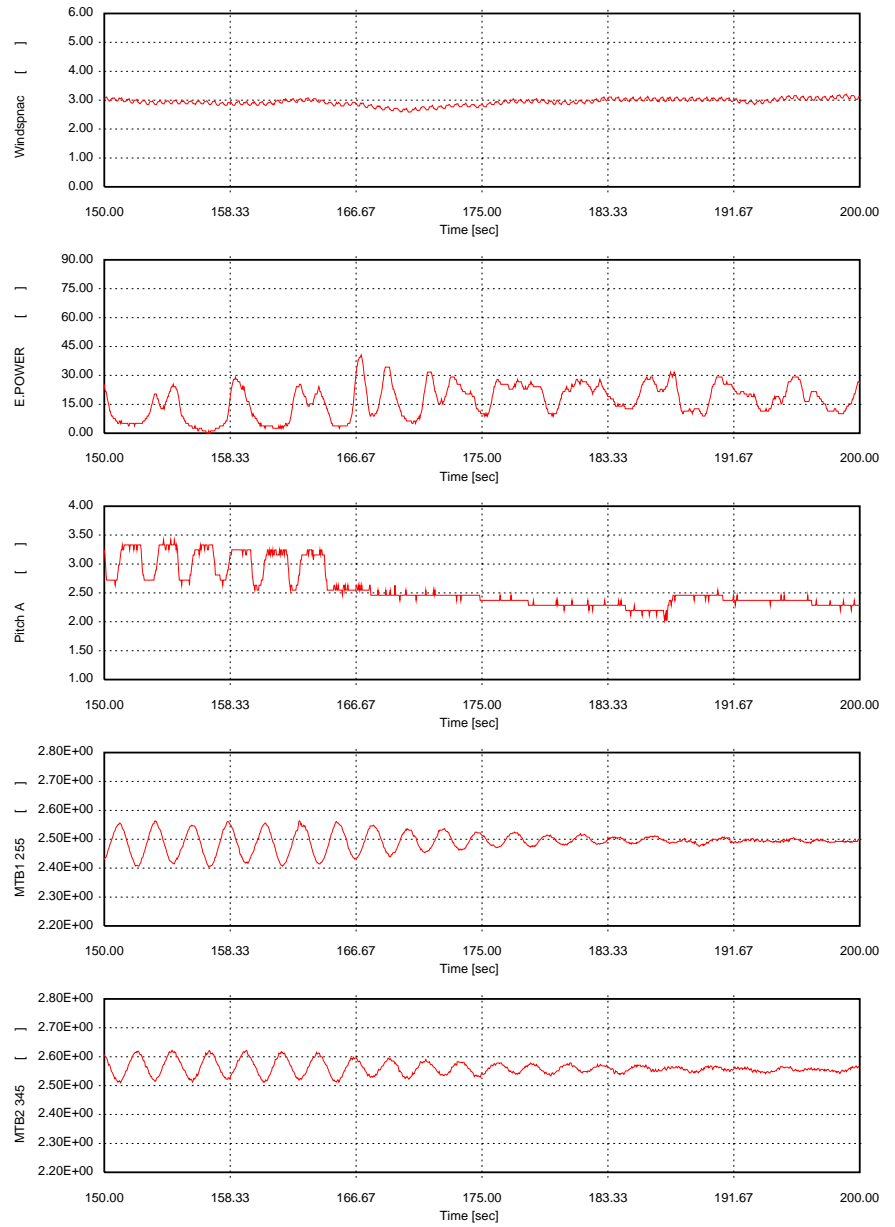
Resultaterne fra exciterforsøgene er illustreret i figurerne 31 og 32. Ved $t=90$ sekunder startes den symmetriske pitchning og ved $t=165$ stoppes excitationen. Det ses tydeligt, at der opbygges en tårnsvingning på tårnets 1. egenfrekvens, og at denne svingning klinger ud efter stop af excitationen.

Lastsignalerne har ikke været kalibrerede under disse excitationsmålninger, men lastniveauet kan vurderes udfra den ukalibrede middelfkurve af det langsgående tårnmoment, figur 33.

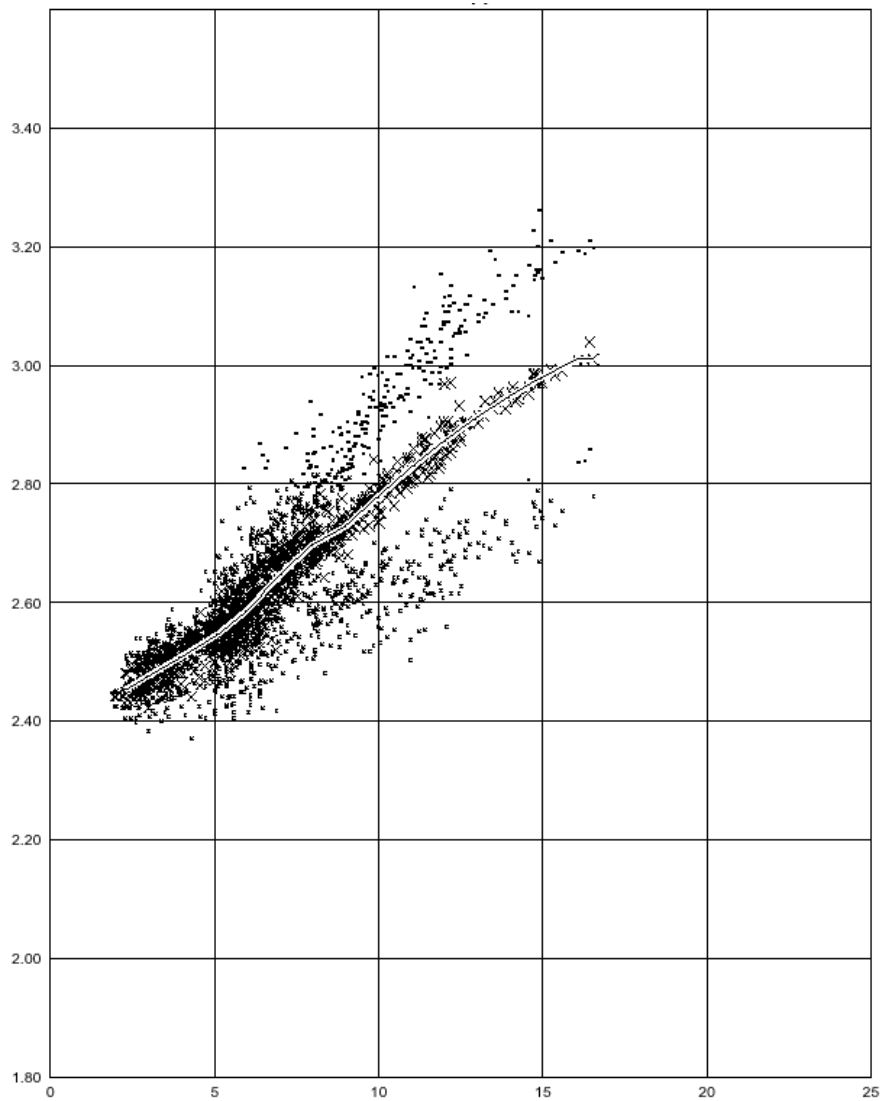
I figur 31 ses det, at svingningen vokser op til et konstant niveau i løbet af ca. 12 sekunder. Dette niveau er valgt udfra sikkerhedshensyn. Niveauet af svingningen kan vurderes udfra statistikkurven for tårnlasten som funktion af vindhastigheden (se figur 33). Det ses, at vidderne ved pitch-excitationen svarer til cirka halvdelen af den største vidde ved 15 m/s. Selv med den lille pitch-variation er der altså forholdsvis store svingninger. Efter at excitationen stoppes er svingningen døet ud på ca. 20 sek. Der er zoomet på dette område i figur 32.



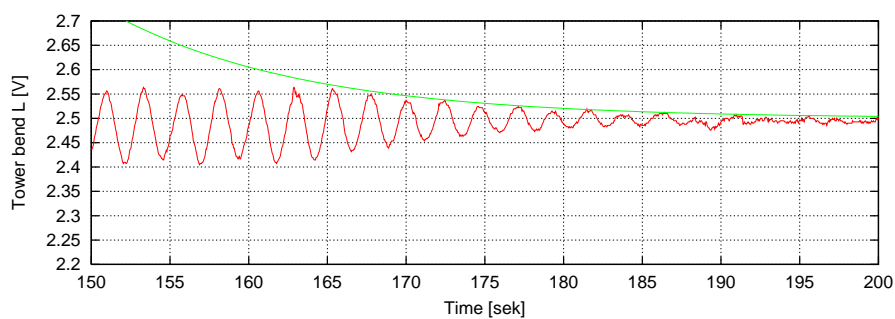
Figur 31. Målte tidsserier for 1.3MW møllen under excitation. Fra top: vindhastighed, elektrisk effekt, pitch vinge 1, langsgående tårnmoment, sideværts tårnmoment.



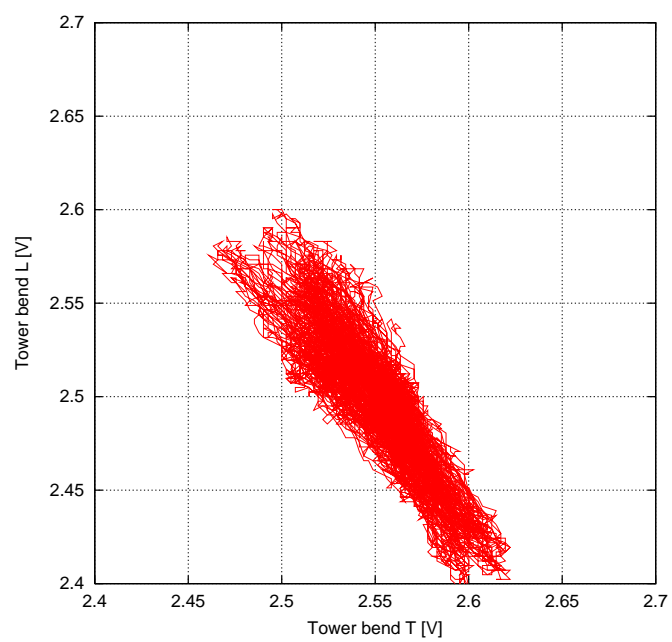
Figur 32. Udsnit af samme tidsserier som i figur 31.



Figur 33. Statistik af langsgående tårnmoment. X-aksen er vindhastighed i m/s, Y-aksen er ukalibrerede [V] tårnlast på langs.



Figur 34. Fitning af exponentialfunktion til målt udsklingning. Excitationen stoppes til $t=165$ sek. Dæmpningen er 20% (log. dekr.) i dette tilfælde.



Figur 35. Svingningsmønster illustreret ved hjælp af målte tårnmomenter ved excitation. Hele serien fra figur 31 er benyttet.

9 Konklusion

Den aeroelastiske interaktionen imellem aerodynamiske kræfter og en elastisk konstruktion er af stor betydning for lastgrundlaget for vindmøller. Et centralt begreb i denne interaktion er aerodynamisk dæmpning som – især i forbindelse med kantvise svingninger – har været genstand for megen opmærksomhed og mange undersøgelser. Den aerodynamiske dæmpning for andre svingningsformer har stor betydning for lasterne generelt, og i denne undersøgelse er der fokuseret på muligheden for at bestemme den aerodynamiske dæmpning for tårnsvingninger og flapvise bladsvingninger.

Der er arbejdet med en metode, hvor en svingningsform exciteres i en periode og derefter stoppes, hvorefter dæmpningen kan bestemmes som udklingningen af et responssignal. Flere forskellige excitationemetoder har været undersøgt. Blandt disse kan nævnes en excitationmekanisme monteret i vindmøllens nacelle, hvor en eller flere roterende masser genererer en periodisk kraft som kan excitere de relevante svingningsformer. Denne metode er tidligere med held blevet brugt til at bestemme den aerodynamiske dæmpning for kantvise svingninger, [2].

Af flere praktiske hensyn er der her valgt et andet excitationsprincip, nemlig en udnyttelse af møllens pitchsystem. Ved at pitche vingerne kan der genereres et varierende aerodynamisk lastinput som kan excitere en given svingningsform for møllen. Pitchfrekvensen og fasen imellem vingerne skal naturligvis afpasses til den ønskede svingningsform.

Aeroelastiske beregninger med FLEX5 og HAWC på en BONUS 2MW mølle har vist at metoden er god til at excitere både tårnsvingninger og flapvise bladsvingninger. Ved excitation af tårnsvingningerne og den symmetriske flapvise svingningsform pitches vingerne med henholdsvis 1. tårnfrekvens og 1. symmetriske flapfrekvens under drift, og en pitchamplitude på nogle få grader har vist sig at være tilstrækkeligt. Skal de flapvise hvirvlingsformer exciteres er det nødvendigt at faseforskyde pitchningen imellem de tre vinger, svarende til retningen af hvirvlingsformen. Også her ser det ud til at en pitchamplitude på få grader er nok til at generere tilstrækkeligt varierende lastinput.

Den udviklede metode er verificeret på en BONUS 1.3MW mølle for excitation af tårnsvingningen.

Perspektivet for den udviklede metode vurderes at være stort, især i forbindelse med validering af stabiliteten af store vindmøller. De fleste vindmøller vil i fremtiden have individuelt regulerbare vinger, og det er oplagt at udnytte dette i exciationsmetoden. Foretages der en systematisk kortlægning af den aerodynamiske dæmpning for de relevante svingningsformer for en given mølle vil det ikke alene være tydeligt om møllen har stabilitetsproblemer, det vil også være muligt at vurdere hvilken margin møllen har til en ustabil tilstand. Dermed kan den udviklede metode også spille en central rolle i forbindelse med verifikation af fremtidens stabilitetsværktøjer.

Litteratur

- [1] Petersen, J.T., H.Aa. Madsen, A. Björck, P. Enevoldsen, S. Øye, H. Ganander, D. Winkelaar (1998). Prediction of Dynamic Loads and Induced Vibrations in Stall. Risø-R-1045(EN), Forskningscenter Risø.
- [2] Thomsen, K.; Thirstrup Petersen, J.; Nim, E.; Øye, S.; Petersen, B., A method for determination of damping for edgewise blade vibrations. Wind Energy (2000) 3 , 233-246.
- [3] Petersen, J. T. (1996) The Aeroelastic Code HawC - Model and Comparisons. In proc. of the 28th IEA Expert Meeting 'state of the art of aeroelastic codes'. Lyngby, Danmark.
- [4] Øye, S. (1996). FLEX4, Simulation of Wind Turbine Dynamics. In proc. of the 28th IEA Expert Meeting 'state of the art of aeroelastic codes'. Lyngby, Danmark.
- [5] Mann, J. (1998). Wind field simulation. Prob. Engng. Mech. Vol. 13, No. 4, pp. 269-282.
- [6] Veers, P. S. (1988). Three-Dimensional Wind Simulation. Sandia Report SAND88-0152 UC-261. Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico.
- [7] Thomsen, K. (2002). Turbulensmodelleringens betydning for tårnlaster. Risø-I-1909(DA), Forskningscenter Risø.
- [8] Bak, C. (2002). Airfoil Characteristics for the LM 36.8 Blade. Risø-I-1864(EN). Risø National Laboratory.
- [9] HAWCModal - Wind Turbine Modal Analysis Tool - User's Guide (2002). Risø-I-1855(EN). Risø National Laboratory.
- [10] Hansen, A. M., M. H. Hansen (2002). HAWCModal: Theory and Verification. Risø-R-1372(EN). To be published.
- [11] Hansen, M. H. (2002). Improved modal dynamics of wind turbines to avoid stall-induced vibrations. Submitted to Wind Energy.
- [12] Simonsen, J. and B. Wollesen (2000). Structural Load Measurements and Verification BONUS 2 MW Wind Turbine, Blåhøj, Denmark. BONUS Report M-2000-04, BONUS Energy A/S, Denmark.

Bibliographic Data Sheet**Risø-R-1371(DA)**

Title and author(s)

Determination of damping for blade and tower mode shapes (In Danish)

Kenneth Thomsen

Dept. or group	Date
Wind energy	October 2002

Groups own reg. number(s)	Project/contract No.
1110027-00	ENS-1363/00-0006

Pages	Tables	Illustrations	References
40	5	35	10

Abstract (Max. 2000 char.)

A method for determination of the aerodynamic damping of blade and tower mode shapes of an operating wind turbine has been established. The mode shapes are excited by the blade pitching system, using a frequency and a phase corresponding to the actual mode shape. After the excitation, it is possible to identify the damping as the decay of response signals from the wind turbine.

The method has been developed and established using aeroelastic load simulation codes, HAWC and FLEX5 for a 2MW stall controlled turbine. Experimental verification has been carried out on a 1.3MW turbine.

Available on request from:

Information Service Department, Risø National Laboratory
(Afdelingen for Informationservice, Forskningscenter Risø)
P.O. Box 49, DK-4000 Roskilde, Denmark
Telephone +45 46 77 40 04 · Telefax +45 46 77 40 13